# ارزیابی دقّت مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) و الگوریتم های GIS در تحلیل های مورفومتری رودخانه‌ای

(نمونه‌ی مورد مطالعه: حوضه‌ی آبریز رباط قره بیل در خراسان شمالی)

**سیدرضا حسین‌زاده (دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده مسؤول)**

**srhosszadeh@ ferdowsi.um.ac.ir**

**مهناز جهادی طرقی (استادیار ژئومورفولوژی دانشگاه پیام نور مرکز فریمان)**

## خلاصه

این تحقیق به ارزیابی کیفیت و دقّت DEMهای نوع ASTER والگوریتم‌های رایانه‌ای نرم افزار ArcGIS در تحلیل‌های مورفومتری رودخانه‌ای می‌پردازد. برای آزمون DEM و همچنین الگوریتم‌های مذکور، ابتدا نقشه‌ی شبکه‌ی زه‌کشی منطقه‌ی مورد مطالعه از طریق عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای استخراج و به عنوان نقشه‌ی پایه یا زمین واقعی مورد استفاده قرار گرفت. سپس به کمک ابزار هیدرولوژی در نرم‌افزار ArcGIS، شبکه‌ی زه‌کشی رسترسی منطقه در دامنه‌های سلولی ۵۰۰ تا ۲۵ سلول برای کل حوضه‌ی آبریز و سپس واحدهای ژئومورفولوژی مختلف استخراج و خصوصیات هیدروگرافی حوضه بر مبنای نقشه‌های به دست آمده مقایسه شدند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هم DEM ها و هم الگوریتم‌های رایانه‌ای در تحلیل‌های هیدرولوژی دارای نقایص اساسی‌اند. بدین‌معنا که نتایج مربوط به مورفومتری آبراهه‌ها گرچه در تحلیل‌های رسترسی برای کل حوضه‌ی آبریز تشابه نسبتاً خوبی را با لایه‌ی مستخرج از عکس‌ها و تصاویر ماهواره‌ای ارائه می‌نماید، اما در تحلیل‌های برداری که لازمه‌ی برخی تحلیل‌های مورفومتری است، نتایج به دست آمده با خطاهای بسیار بزرگی روبرو می‌شود. الگوریتم‌های رایانه‌ای استخراج آبراهه از DEM ها در مناطق کم‌شیب برای تجزیه و تحلیل‌های طول رود ناتوان و در مناطق پرشیب با خطاهایی همراه است. بهترین آستانه‌ی سلولی در استخراج شبکه‌ی

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۲/۲۸    تاریخ تصویب:۱۳۸۹/۷/۲۷

زه‌کشی برای DEMهای ۳۰ متری در مناطق کوهستانی ۲۵، در مناطق دشت سر ناهموار ۵۰ تا ۱۰۰ ، در دشت سر هموار و مخروط افکنه‌ها ۱۰۰ تا ۲۵۰ و در دشت تراکمی ۵۰۰ سلول به دست آمده است.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل های هیدرولوژی، مورفومتری آبراهه، مدل‌های رقومی ارتفاع، استخراج آبراهه

**درآمد:**

مدل‌های رقومی ارتفاع[1] (DEMs) که حاصل جمع‌آوری داده‌های ارتفاعی به روش‌های سنجش از دور است، طیّ دهه‌های اخیر کاربرد وسیعی در ژئومورفولوژی و سایر علوم زمین داشته و به کمک الگوریتم‌های رایانه‌ای همچنان رو به توسعه است. منابع تولید DEMها امروزه از تنوع زیادی برخوردار بوده و دقّت‌های مختلف از چند صدمتر تا کمتر از دو متر را در بر می‌گیرد (جدول شماره ۱). در بسیاری از موارد نیز که در کشور ما مرسوم است، نقشه‌های توپوگرافی کاغذی را اسکن و پس از رقومی‌سازی به کمک نرم‌افزارهای GIS به یک رستر ارتفاعی تبدیل می‌نمایند. گرچه به نظر می‌رسد درستی و دقّت تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر DEMها تا حد زیادی به قدرت تفکیک DEM های اولیه بستگی دارد، ولی بنا به اظهار نظر بسیاری از پژوهشگران نمی‌توان پذیرفت که DEMهای رستری با ابعاد سلولی کوچکتر همیشه نتایج رضایت‌بخش‌تری دارند (به عنوان مثال: بیان و والش[2] ۱۹۹۳، لَم و کواتراچ[3] ۱۹۹۲، کینزل[4] ۲۰۰٤، لاژِر و راندین[5] ۲۰۰٦، جیانگ و وانگ[6] ۲۰۱۰ ).

1. Digital Elevation Models
2. Bian & walsh
3. Lam & Quattroch
4. Kienzle
5. Lassueur & Randin
6. Jiang & Wong

جدول شماره (۱): خصوصیات DEMهای مختلف

| روش تهیه DEM | نوع DEM | قدرت تفکیک مکانی به متر | دقت ارتفاعی به متر |
|---|---|---|---|
| Photogrametric | Terra ASTER<br>SPOT 5<br>Ikonos<br>HRSC<br>HIRISE | 30<br>30<br>2<br>50<br>1 | 2<br>10<br>1.5<br>20<br>0.2 |
| IF SAR | SRTM-C-band (11/02/2000)<br>SRTM X-band (11/02/2000)<br>ERS Tandem (oct 1995-June 1996)<br>Terra SARX<br>Terra ASAR | 90<br>30<br>25<br>12<br>25 | 10<br>6<br>20<br><2<br>20 |
| Airborn | IF SAR (Next MAP)<br>LIDAR | 1-5<br>< 2 | 2.1<br>< 0.25 |
| سایر | MOLA | 460 (DEM) | (مقدار نقطه ای)<br>0.38 |

( اسمیت وبیان ۲۰۰۹ : ۵۷۳)

حتی اگر بپذیریم DEM های با قدرت تفکیک بالاتر نتایج بهتری خواهند داشت، دو نکته باید مورد توجه قرار گیرد: اول آن‌که داده‌های مذکور نه تنها برای تمام کره‌ی زمین موجود نیست، بلکه دسترسی آسان و ارزان به آنها نیز وجود ندارد. به عنوان مثال داده‌های LIDAR[1] از این‌گونه داده‌ها هستند که فقط برای مناطق محدودی از ایالات متحده آمریکا در دسترس‌اند و از طرفی نیاز به اصلاحات زیاد و حتی تغییر به DEM های با قدرت تفکیک پایین‌تر دارند. دوم این‌که، در بسیاری موارد هنوز صحت و کارایی الگوریتم‌های متعدد رایانه‌ای به طور کامل بهبود نیافته و نیاز به بررسی‌ها و آزمون‌های بیشتری دارند. بدین ترتیب یکی از رویکردهای اساسی جهت

1. Light detection and ranging

تعیین حساسیت، کیفیت و درستی کاربردهای استفاده از DEMهـا و الگـوریتم‌هـای رایانـه‌ای، کـاربرد روش‌های مقایسه‌ای و معیارها و شاخص‌هایی نزدیک به زمین واقعی است.

از آن‌جا که یکی از کاربردهای مهم DEMها استخراج شبکه‌ی زه‌کشی برای تحلیل‌هـای مورفومتری و استفاده در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک است، در این نوشتار، به ارزیابی دقّـت و درستی کمی و کیفی DEM های نوع ASTER[1] در استخراج شبکه‌ی رودخانـه‌ای بـه وسـیله‌ی الگوریتم‌های موجود در بسته‌ی نرم‌افزاری ArcGIS پرداخته‌ایم. DEMهای نـوع ASTER، بنـا به پیشنهاد بسیاری از پژوهشگران جزو بهترین داده‌های رقومی ارتفاع در تجزیه و تحلیـل‌هـای ژئومورفولوژی به شمار می‌روند (به عنوان مثال: اسمیت و پین،[2] ۲۰۰٦). مطالعات قبلی ابتدا روی الگوریتم‌های رایانه‌ای متمرکز بوده ولی در سال‌هـای جدیـدتر بیشـتر بـه DEMهـای مختلـف پرداخته شده است. در مورد الگوریتم‌ها مـی‌تـوان بـه کارهـای افـرادی چـون دانکـر[3] (۱۹۹۲)، جانسون و دومینگو[4] (۱۹۸۸)تریب[5] و دیگران (۱۹۹۲)، دیاموند[6] و دیگران (۱۹۹٤)اشاره کـرد. در این مطالعات سه رویکرد برای استخراج خودکار دره و سلول‌های زه‌کشی کننـده تشـخیص داده شده است (تریب۱۹۹۲ به نقل از گارسیا و کمرسا،[7] ۱۹۹۹)؛ اول شناسایی سلول‌های منحصـر به فردی از DEM به عنوان سلول‌هـای خـط‌القعـر کـه سـلول‌هـای اطـراف آنهـا در موقعیـت مرتفـع‌تـری قـرار گرفتـه باشـند (پـانکرو داگـلاس[8] ۱۹۷۵؛ تـورواکی و فـاکوم[9] ۱۹۸۷؛ داگـلاس ۱۹۸٦).دوم تعیین مسیرهای زه‌کشی به داخـل هـر سـلول از DEM و کـاربرد آن در اسـتخراج

1. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
2. Smith & Pain
3. Donker
4. Janson & Domingo
5. Tribe  Mark & Callagan
6. Dyamond & Harmsworth
7. Garsia & Camarasa
8. Peunker , Douglas
9. Torwaki , Fukum

آبراهه‌ها (اسکالاگان و مارک[1]، ۱۹۸٤) و سوم روش‌های ترکیبی بر مبنای تلفیق دو رویکرد بالا که در نرم‌افزارهای تجاری GIS تعبیه شده است.

دانکر( ۱۹۹۲) روش عمومی، که بیشتر الگوریتم‌های موجود دنبال می‌کنند، را مبتنی بر چهار ماتریس اساسی به نام‌های ماتریس ارتفاع، جهات جریان، درجه‌بندی ارتفاع و تجمع جریان معرفی می‌کند. ماتریس ارتفاع همان رستر ارتفاعی است که نشان‌دهنده‌ی مدلی از توپوگرافی واقعی بوده و DEM ها یا DTM[2] ها را شامل می‌شود. رستر یا ماتریس جهت جریان عبارت است از جهات جریان آب از هر سلول به خارج آن که از هشت جهت ممکن، جهت بیشینه‌ی شیب به سمت پایین دست را دنبال می‌کند. رستر درجه‌بندی شده ارتفاع، سلول‌های DEM را از بالاترین ارتفاع تا پست‌ترین آنها درجه‌بندی نموده و سرانجام رستر تجمع جریان، دربرگیرنده‌ی مساحت زه‌کشی شریک در زه‌کشی هر سلول است. تمام سلول‌های با مقدار بالاتر نسبت به یک آستانه‌ی مشخص، شبکه‌ی زه‌کشی پیوسته‌ای را به وجود می‌آورند که در آن DEM بدون حفره یا فرورفتگی‌های بسته است.

مقالاتی که تاکنون در ارتباط با موضوع مورد مطالعه منتشر گردیده، علاوه بر این‌که مناطق کوچکی را در بر می‌گرفته، تنها با اتکاء به یک شاخص و مبتنی بر تحلیل‌های رستری بوده است. به عنوان مثال گارسیا و دیگران پس از مقایسه‌ی آبراهه‌های مستخرج از عکس‌های هوایی و یک DEM حاصل از نقشه‌های توپوگرافی ۵۰/۰۰۰ : ۱ فقط به مقایسه‌ی تراکم زه-کشی لایه‌ها بر مبنای لایه‌های رستری پرداخته و پیشنهادهای خود را بر همین مبنا ارائه می‌نمایند. همچنین استفن وایزه[3] (۲۰۰۰) در تحلیل خود یک DEM حاصل از نقشه توپوگرافی و سه زیر حوضه بسیار کوچک را در یک منطقه کوهستانی مورد بررسی قرار می‌دهد و به نتیجه‌ی

1. Scallagan , mark
2. Digital Terrain model
3. Stephen Wise

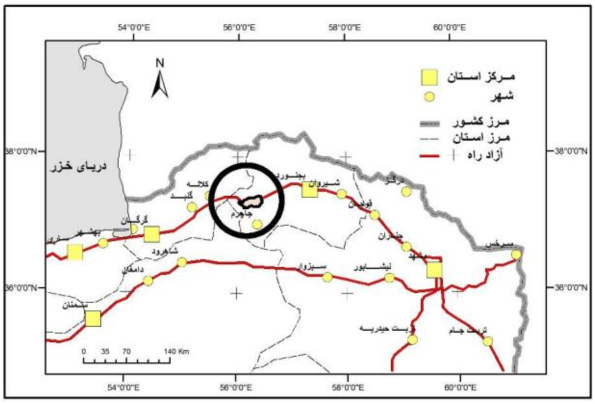
روشنی دست نمی‌یابد. جیانگ و دیگران[1] (۲۰۱۰) در یک بررسی به مقایسه‌ی تطبیقی دو نوع DEM یعنی DEM های SRTM[2] و LIDAR پرداخته و نتیجه می‌گیرند اگر قدرت تفکیک DEM های LIDAR را از دو متر به ۱۰ و ۳۰ متر کاهش دهیم، نتایج آن در مقایسه با SRTMها مناسب‌تر است. در این مقاله کارهای آنان با دقت و تفصیل بیشتری دنبال شده، به گونه‌ای که اولاً منطقه‌ی مطالعاتی وسیع‌تر و متنوع‌تر است، دوم آن‌که تجزیه و تحلیل‌ها هم از نوع رستری و هم وکتوری است، سوم آن‌که تحلیل‌ها براساس رتبه‌بندی آبراهه‌ها صورت گرفته که در هیچ‌یک از مطالعات قبلی به آن توجه نشده، چهارم این‌که در ارزیابی داده‌ها از چند شاخص به جای یک شاخص استفاده شده و پنجم آن‌که موقعیت مکانی آبراهه‌ها نیز با دقت بیشتری در دو لایه مقایسه شده است. به دلیل اهمیت لایه‌ی مستخرج از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای که ما آن‌را در این مقاله لایه‌ی Geo یا لایه‌ی زمینی نامیده‌ایم، پرزحمت‌ترین بخش این تحقیق شناسایی، استخراج و دسته‌بندی آبراهه‌ها از منابع مذکور بوده است.

**معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه**

محدوده‌ی مورد مطالعه با عنوان حوضه‌ی آبریز رباط قره‌بیل یا چشمه خان با گسترش طولی در جهت عرض جغرافیایی یکی از زیرحوضه‌های رودخانه مادرسو بوده که با وسعت ٤٦٦ کیلومترمربع بین ″۱٥ ′۱٥ °۳۷ تا ′۲٦ °۳۷ عرض شمالی و بین ″۲٥ ′۰۱ °٥٦ تا ″۳۰ ′۲۷ °٥٦ طول شرقی قرار گرفته است. این حوضه منطبق بر قسمت‌های غربی استان خراسان شمالی بوده و عبور جاده آسفالته‌ی مشهد به شمال کشور از میان آن، دسترسی آسان به منطقه را فراهم می‌آورد (شکل ۱).

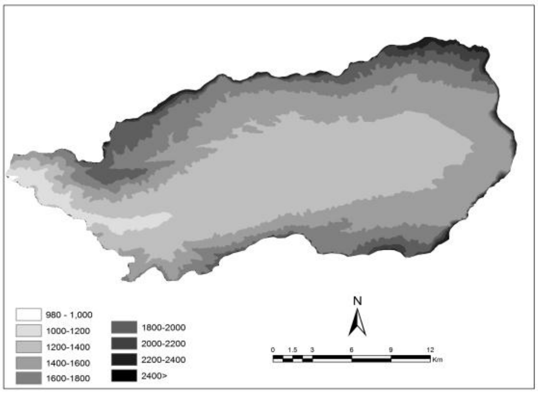
1. Jiang Li, David W.S. Wong
2. Shatel Radar Topography Mission

**شکل شماره (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه**



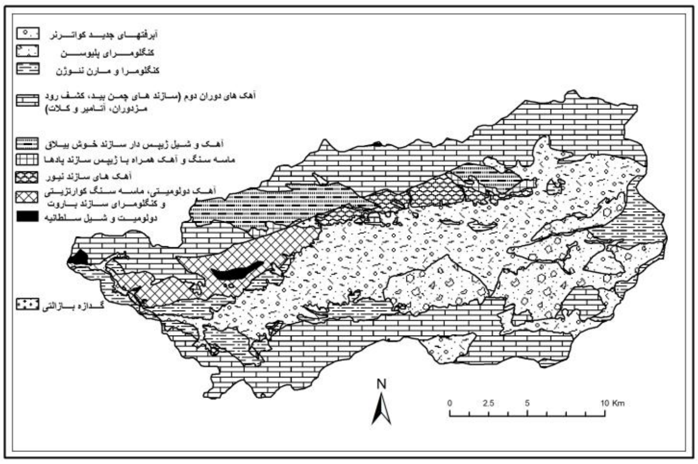

ارتفاع بلندترین قلل خط‌الرأس‌های شمالی حوضه در منتهی الیه شمال‌شرق رشته کوه کپه‌داغ به بیش از ۲٤۰۰ متر می‌رسد، اما خط‌الرأس جنوبی حوضه که به موازات خط‌الرأس شمالی آن کشیده شده از ارتفاع کمتری برخوردار است. پست‌ترین نقطه‌ی حوضه در محل خروجی آن ۹٦۸ مترارتفاع داشته و بیشترین سطوح ارتفاعی حوضه را سطوح ۲۲۰۰ تا ۲٤۰۰متر تشکیل می‌دهند (شکل شماره ۲). از نظر زمین‌شناسی بیشتر مناطق مرتفع حوضه در سنگ‌های آهکی دوران دوم شکل گرفته که شامل سازندهای چمن بید، مزدوران، خوش ییلاق، کلات و باروت است.

**شکل شماره (۲): توپوگرافی حوضه‌ی آبریز رباط قره‌بیل**



این سازندها با وسعت ۱۷۵ کیلومترمربع حدود چهل درصد از وسعت منطقه و بـه عبـارتی ٦٨ ٪ از کل منطقه‌ی کوهستانی را به خود اختصاص می‌دهند. مارن‌های نئوژن در پایکوه‌هـا بـا وسعت ۳۱/۵ کیلومترمربـع، یکـی از حسّاس‌تـرین واحـدهای سـنگ‌شناسـی منطقـه در برابـر فرسایش بوده و رسوبات پلیـو- کـواترنر در اراضـی جنـوب‌شـرق آن بـه وسـعت حـدود ۵۰ کیلومترمربع بخش‌های نیمه مرتفع حوضه را به وجـود آورده اسـت. رسـوبات قـدیم و جدیـد کواترنری در بخش کم ارتفـاع حوضـه یعنـی در محـدوده‌ی دشـت بـا وسـعتی معـادل۱۲۰/۷ کیلومترمربع یعنی ٢٦/٤ درصد از سطح حوضه را می‌پوشاند(نقشه شماره ۳).

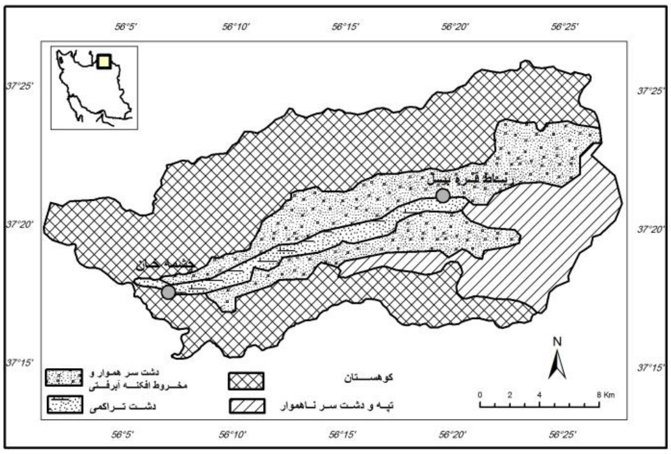
**شکل شماره (۳): نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه**




از نظر ژئومورفولوژی ساختمانی این حوضه متأثر از روند عمومی ناهمواری‌ها و گسل‌های بزرگ طولی در مرز بین دشت و کوهستان بوده، لذا روندی غربـی – شـرقی بـه خـود گرفتـه است. همین عوامل و البته تکتونیک فعّال منطقه در طول کواترنر باعث تنوع مورفولـوژیکی آن شده، به گونه‌ای که می‌توان چهار واحد مشخص ژئومورفولوژی یعنـی کوهسـتان، دشـت سـر ناهموار، دشت سرپوشیده (مخروط افکنه‌ها) و دشـت تراکمـی را در محـدودهٔ حوضـه‌ی آبریـز مشاهده نمود (شکل شماره ٤). واحد کوهستان با وسعت ۲۵۷ کیلومترمربع، ٥٦/٥ درصد، دشت

سرهای ناهموار در سنگ بستر و آبرفت‌های قدیمی با وسعت ۷۱/۷ کیلومترمربع، ۱۵/۸ درصد، دشت سرهای پوشیده با ۱۰٤ کیلومترمربع، ۲۲/۸ درصد و دشت تراکمی با ۲۲/۳ کیلومترمربع، ٤/۹ درصد از کل حوضه‌ی مورد نظر را به خود اختصاص می‌دهند. واحد کوهستان با شیب زیاد در شمال و جنوب حوضه، موجب شکل‌گیری زیرحوضه‌های متعددی شده که آبراهه‌ی اصلی هر کدام از آنها در محل ورود به محدوده‌ی دشت سر، یک مخروط افکنه آبرفتی را به وجود آوردند. به دلیل نقش فعّال تکتونیک هنوز در نقاط متعددی از کوهستان شبکه‌ی زه‌کشی تابع تغییر شکل‌های تکتونیکی بوده و به نظر می‌رسد نسل‌های مختلف مخروطافکنه‌ها روی دشت سر نیمه شمالی حوضه ناشی از عملکرد گسل‌های طولی این مناطق باشد. در دشت‌سر- پوشیده نیمه‌ی شمالی به دلیل نقش مخروطافکنه‌ها درتقطیع جریان‌ها، الگوهای واگرا غلبه داشته، ولی به سمت دشت تراکمی مجدداً الگوی هم‌گرایی در شبکه‌های گیسویی به چشم می‌خورد. در محدوده‌ی دشت سرهای ناهموار جنوب‌شرق حوضه عمدتاً الگوهای زه‌کشی موازی تا درختی شکل گرفته است. در محدوده‌ی دشت تراکمی و قاعده‌ی مخروطافکنه‌های جدید، آبراهه‌های فرعی با تمایل به سمت غرب یعنی در جهت خروجی حوضه و در امتداد شیب کلی حوضه خود را به آبراهه‌ی اصلی می‌رسانند. در محل پیوستن آبراهه‌های فرعی به آبراهه‌ی اصلی دو عامل بر مسیر شبکه‌ی آب‌ها تأثیر گذاشته، اول جاده مشهد – گرگان که تقریباً تمام آبراهه‌های پهنه‌ی شمالی دشت را قطع می‌کند و دوم اراضی کشاورزی خصوصاً در محدوده‌ی دشت تراکمی که تعیین مسیرهای طبیعی جریان‌ها را با زحمت روبرو کرده است. آبراهه‌ی اصلی حوضه نیز در حدود مرکزی دشت تراکمی به سرنوشت مشابهی دچار شده، خصوصاً که در انتهای غربی دشت تراکمی، به دلیل عملکرد مثبت تکتونیک جدید و تبدیل حوضه به یک حوضه‌ی نیمه مستقل به سختی می‌توان مسیر آن‌را دنبال کرد. البته از حوالی غرب روستای چشمه خان به سمت خروجی حوضه، شیب آبراهه‌ی اصلی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد.

**شکل شماره (۴): نقشه ژئومورفولوژی حوضه رباط قره‌بیل**




**مواد و روش‌ها**

مواد مورد استفاده این تحقیق شامل عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاع (DEM) نوع ASTER و نقشه‌های توپوگرافی کاغذی بوده است. در تمام مراحل آماده‌سازی داده‌ها و تحلیل آنها از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده و بازدیدهای میدانی پراکنده نیز در روشن شدن پاره‌ای ابهامات کمک کرده است. روش تحقیق که از نوع تحلیلی – مقایسه‌ای بوده شامل سه مرحله‌ی استخراج دستی شبکه‌ی روخانه‌ای، استخراج رایانه‌ای از مدل‌های رقومی ارتفاع و مقایسه و تجزیه و تحلیل آنها بوده که در زیر به شرح آن می پردازیم.

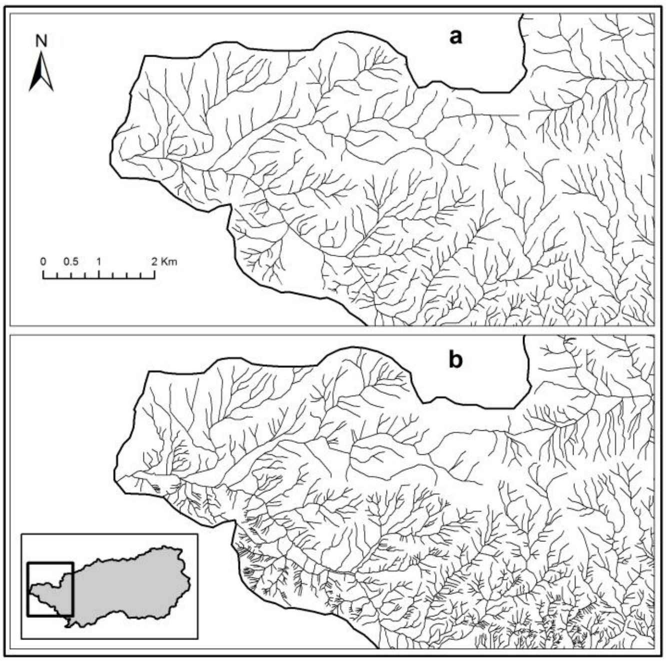
**استخراج دستی شبکه‌ی زه‌کشی منطقه**

اصولاً شبکه‌ی آب‌ها را به روش سنتی از نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی استخراج و ترسیم می‌نمایند. برای این موضوع آبراهه‌های حاصل از نقشه‌های ۲۵۰۰۰ : ۱ منطقه فقط جهت یک مقایسه‌ی کلی با نتایج حاصل از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای ترسیم و مورد استفاده قرار گرفته است. عکس‌های هوایی ۲۰۰۰۰ : ۱ سال۱۳٤٥ منبع اصلی استخراج آبراهه‌ها بوده، اما از آن‌جا که تمام عکس‌های هوایی منطقه در بایگانی سازمان

جغرافیایی و همچنین سازمان نقشه‌برداری کشور وجود نداشت به ناچار از عکس‌های هوایی ۵۵۰۰۰ : ۱ سال ۱۳۳۵ و تصاویر ماهواره‌ای IRSpan و IRS LISS-III نیز استفاده شده است. تصویر ماهواره‌ای IRSpan با قدرت تفکیک ۵×۵ متر مربوط به مردادماه ۱۳۸۳ بوده و تصویر IRS رنگی با قدرت تفکیک ۱۵×۱۵ متر نیزمربوط به همان تاریخ است. چون تصویر LISS-III IRS مناطق بسیار وسیع‌تری در اطراف منطقه‌ی مطالعاتی را شامل می‌شد و توسط سازمان جغرافیایی کشور با دقتی بسیار بالا ژئورفرانس شده بود، معیار انتخاب نقاط کنترل زمینی برای سایر منابع قرار گرفت. با توجه به قدرت تفکیک خوب تصویر IRSpan ، برای بخش‌های غربی منطقه، شبکه‌ی آب‌ها به دقت در محیط ArcGIS از این تصویر رقومی گردید و برای بخش‌های شرقی حوضه، آبراهه‌ها از عکس‌های هوایی استخراج و به آبراهه‌های حاصل از تصویر IRSpan متصل گردید. در این مطالعه با توجه به قدرت تفکیک عکس‌های هوایی ۲۰/۰۰۰ : ۱، ۵۵/۰۰۰ : ۱ و تصاویر ماهواره‌ای و همچنین ابعاد سلولی لایه‌ی DEM معیار ۵۰ مترطول برای رودخانه‌های رتبه ۱ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از عکس‌ها وتصاویر ماهواره ای در قالب شکل شماره b-۵ ارائه گردیده و اگر این نقشه با نقشه‌ی آبراهه‌های حاصل از نقشه‌های توپوگرافی (شکل شماره a–۵) مقایسه شود به خوبی آشکار می‌گردد که امکان استخراج همه شبکه آب‌ها از طریق نقشه‌های توپوگرافی وجود ندارد. گرچه که این موضوع از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای هم به طور کامل امکان‌پذیر نیست، ولی می‌توان لایه‌ی حاصل از عکس‌ها و تصاویر ماهواره‌ای را نزدیکترین مدل به زمین واقعی دانست. رتبه‌بندی آبراهه‌ها در این مقاله بر مبنای روش استرالر[1] (۱۹۵۱) صورت گرفته است. این روش گرچه نسبت به روش‌های هورتن[2] و شرو[3] در برخی مکان‌های ویژه با خطاهایی همراه است، ولی به عنوان یک روش شناخته شده در همه‌ی دنیا مورد تأیید بوده و به طور وسیعی استفاده می‌شود. (فریفته، ۱۳۷۰: ۱۰ـ۸)

1. Strahler
2. Horton
3. Shrere

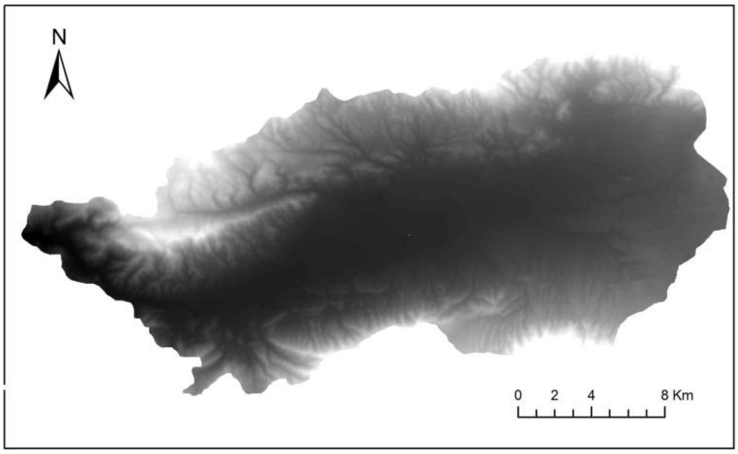
**شکل شماره(۵): شبکه‌ی آب‌های مستخرج از نقشه‌های توپوگرافی (a) و عکس‌ها و تصویرهای ماهواره‌ای (b)**




**استخراج رایانه‌ای شبکه‌ی زه‌کشی از مدل رقومی ارتفاع**

استخراج شبکه‌ی زه‌کشی منطقه در محیط GIS از یک DEM رستری از نوع ASTER با ابعاد سلولی ۳۰×۳۰ متر و با استفاده از ابزار Hydrology در بسته نرم‌افزاری ArcGIS 9.3x انجام گرفته است. مسؤول تأمین و توزیع DEM های ASTER کشور ژاپن است که در سال ۱۹۹۹ سیستم جمع‌آوری این داده‌ها را روی ماهواره Terra، متعلق به کشور آمریکا، قرار داد. مراحل استخراج شبکه‌ی زه‌کشی از DEM مذکور به طور خلاصه در شکل شماره ۷ ارائه شده است.قبل از شروع به استخراج آبراهه‌ها باید هرگونه نقص احتمالی در DEM بررسی و رفع شود. این نقایص شامل مجموعه‌ای از سلول‌هاست که تشکیل چاله‌های بسته را می‌دهند و موجب بروز خطا در اجرای الگوریتم‌ها می‌شوند.

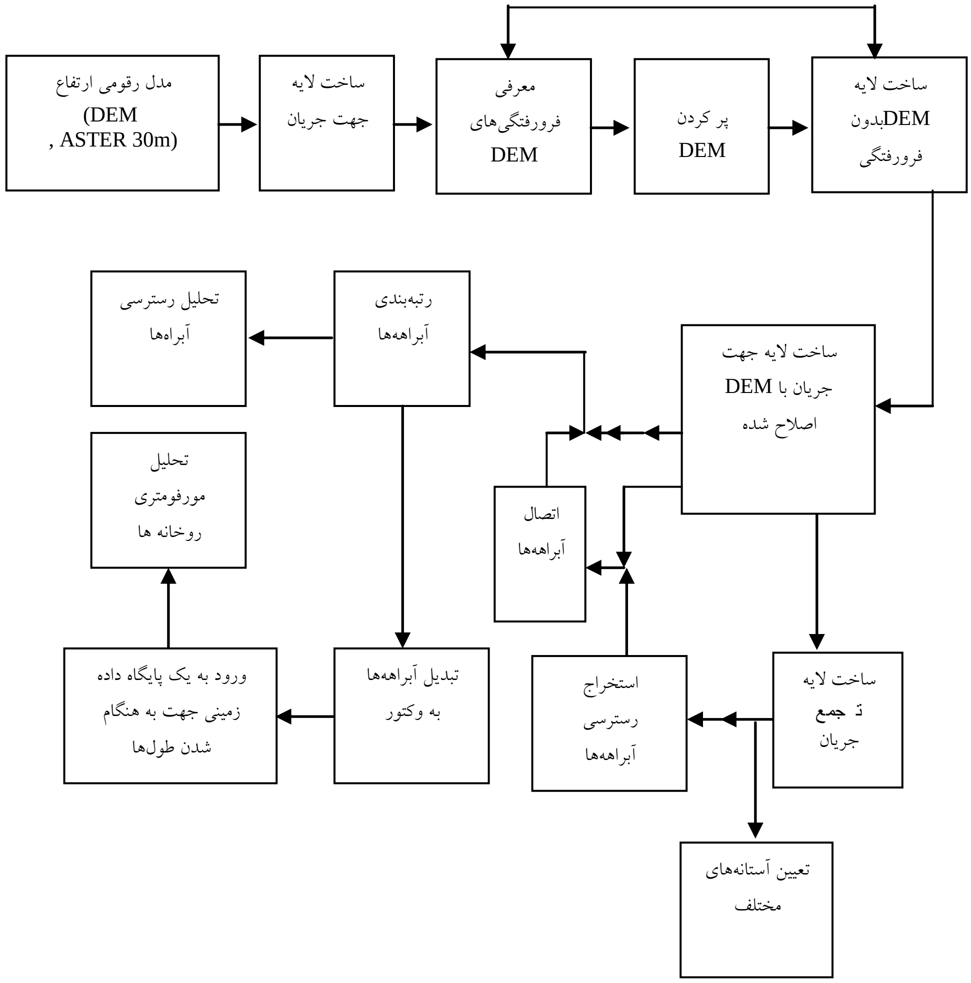
**شکل شماره (۶) DEM منطقه‌ی مورد مطالعه**




برای بررسی خطاهای DEM ابتدا لایه جهت جریان ساخته شد و سپس با استفاده از تابع Sink در ابزار Hydrology حفره‌های موجود در لایه جهت جریان شناسایی شد، که تعداد ۱۵٦ حفره را نشان می‌داد. ابعاد تمام این حفره‌ها در حد ۱ تا ۲ سلول بود که از دستور Fill در ابزار بالا برای پر کردن این چاله‌ها استفاده و DEM جدید و بدون نقصی ساخته شد. در مرحله‌ی بعد لایه‌ی رستری جهت جریان از DEM پر شده ساخته شد. روشی که غالباً برای تعیین جهت جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد، به روش D8 شهرت دارد. این روش که توسط نرم‌افزار ArcGIS به کار گرفته می‌شود جهت جریان یک سلول را به یکی از هشت سلول در برگیرنده آن که دارای بیشترین اختلاف شیب است، هدایت می‌کند. روش D8 اجازه‌ی تقسیم جریان به چند سلول را نمی‌دهد. تجارب موجود عدم توفیق روش بالا را در مناطق کم شیب نشان می‌دهد (مثلاً فریمن،[1] ۱۹۹۱؛ گارسیا و کمرسا، ۱۹۹۹)، لذا الگوریتم‌های دیگری مانند $D^{\infty}$ اختراع و در نرم‌افزارها از جمله نرم‌افزار ArcGIS گنجانده شده است(حسین زاده و بیدخوری، ۲٤٥:۱۳۸۷ ).

1. Freeman

**شکل شماره (۷) مراحل استخراج آبراهه‌ها از DEM**




**(با اندکی تصرف به نقل از جیانگ و وانگ، ۲۰۱۰: ۲۵۵)**

پس از تهیه‌ی رستر جهت جریان، لایه‌ی رستری تجمع جریان از آن استخراج گردید. لایه‌ی تجمع جریان برای هر سلول، تعداد سلول‌هایی را که جریان خود را به سلول مذکور هدایت خواهند کرد تعیین و درجه‌بندی می‌نماید. در این لایه تعداد سلول‌هایی که بالاترین

مقدار تجمع را دارند منطبق بر کانال رودها و سلول‌هایی با مقدار تجمع صفر منطبق بر خط‌الرأس‌ها هستند. لایه‌ی شبکه‌ی آبراهه‌ها از لایه‌ی رستری تجمع جریان استخراج گردید، برای انجام این عمل باید ابتدا آستانه‌ی مقدار تجمع را تعیین کرد که در این مقاله به دلیل مشخص نبودن نزدیکی چه مقدار آستانه به نقشه‌ی دستی آبراهه‌ها، ابتدا آستانه ۵۰۰ سلول، سپس ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰ و ۲۵ به ترتیب برای ساخت لایه‌ی رستری شبکه‌ی آب‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. به عبارت دیگر چون مقدار آستانه بالاتر تراکم زه‌کشی پایین‌تر و مقدار آستانه پایین‌تر تراکم زه‌کشی بالاتری را ایجاد می‌نمایند، برای نزدیک کردن لایه‌ی مستخرج از DEM به لایه‌ی سطح زمین از آستانه‌های بالا شروع و به آستانه‌ی ۲۵ سلول ختم گردید. مرحله‌ی بعد تهیه‌ی لایه اتصال آبراهه‌ها به یکدیگر بود که با استفاده از دستور Stream Link در جعبه‌ی ابزار Hydrology برای تمام لایه‌های رستری آبراهه‌ها ساخته شد و در آخرین مرحله، لایه رتبه‌بندی آبراهه‌ها به روش استرالر انجام و علاوه بر فرمت رستری به وکتور نیز تبدیل و جهت تجزیه و تحلیل ذخیره گردید.

**مقایسه‌ی لایه‌های حاصل از روش دستی و رایانه‌ای**

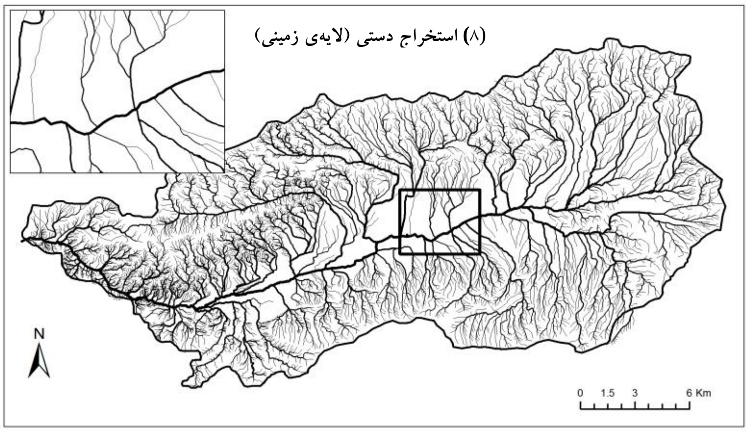
مقایسه‌ی لایه‌ها هم در فرمت رستری و هم در فرمت وکتوری انجام و شاخص‌های مقایسه شامل فراوانی شاخه‌ها، طول رودها، تراکم و ضریب زه‌کشی بوده است. این تحلیل‌ها با توجه به تطابق اولیه و کلی رودخانه‌های مستخرج از DEM در آستانه‌ی ۲۵ سلول با رودخانه‌های مستخرج از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، ابتدا برای کل حوضه و سپس به تفکیک برای واحدهای مختلف ژئومورفولوژی جهت آزمون DEM و الگوریتم‌ها صورت گرفته است. یکی دیگر از تحلیل‌های مقایسه‌ای، میزان درستی موقعیت مکانی آبراهه‌ها بوده که از برهم گذاری لایه‌های رستری مستخرج از DEM با لایه‌ی دستی انجام شده است. برای این کار لایه‌ی وکتوری دستی ابتدا به فرمت رستری با ابعاد سلول ۳۰×۳۰ متر تبدیل

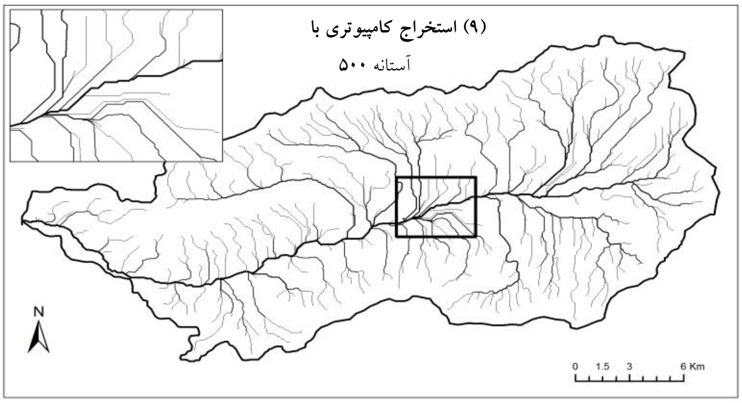
گردید، ولی در هیچ‌یک از لایه‌ها بر مقدار ابعاد سلول افزوده نشد، زیرا اولاً بررسی بصـری دو لایه خطاهای بارز ژئورفرنس را نشان نمی‌داد و ثانیـاً افـزایش مقـدار سـلولی موجـب تـداخل آبراهه‌های رتبه ۱ در بسیاری از مناطق مـی‌شـد. حاصـل کارهـای تحلیـل در قالـب جـداول و نقشه‌ها ارایه گردید.

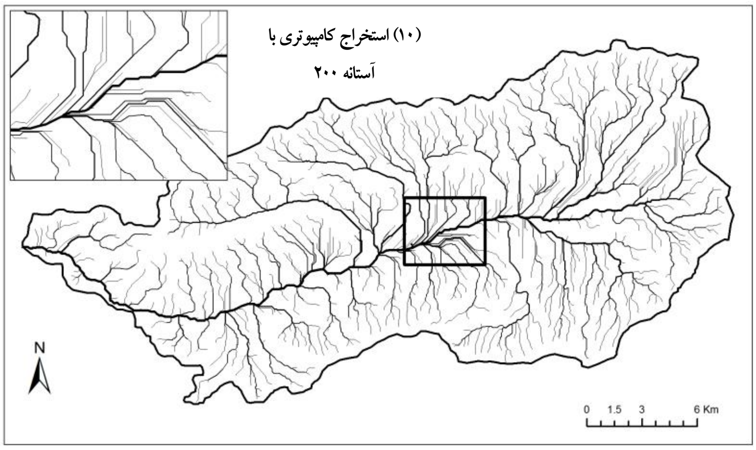
**نتایج و بحث**

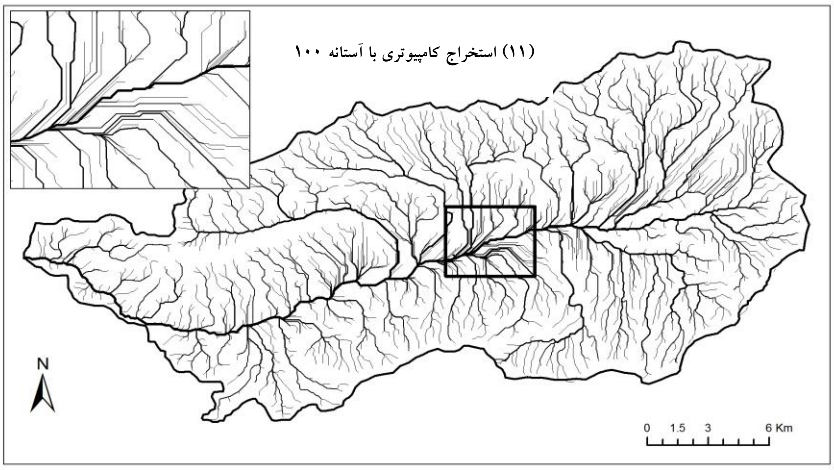
اشکال شماره ۸ تـا ۱۳نقشـه‌هـای مختلـف شـبکه‌ی زه‌کشـی مسـتخرج بـا دو روش و در آستانه‌های سلولی متفاوت را ارائه می‌نمایند. نتایج عددی حاصل از ایـن نقشـه‌هـا بـه صـورت سلول‌های مربوط به هر رتبه از آبراهه‌ها در جدول شماره ۲ خلاصه شده اسـت. بـا توجـه بـه جدول و همچنین بررسی بصری لایه‌ها می‌بینیم که تنها آستانه‌ی سـلولی کـوچکتر از ۲۵ متـر، نتایجی مشابه لایه‌ی رستری شده‌ی آبراهه‌های مستخرج به روش دستی را، نشان مـی‌دهـد. در آستانه‌های بالا، حتی ۵۰ سلول می‌بینیم که علاوه بر کاهش تعداد رتبه‌ها به دلیل کـاهش تـراکم زه‌کشی، تعداد سلول‌های مربوط به سایر رتبه‌ها نیز به طور چشمگیری کاهش می‌یابـد. از نظـر ظاهری و برای کارهای مقدماتی یا نمایشی نتایج عددی حاصـل از آسـتانه‌هـای سـلولی بـالاتر نظیر ۲۰۰ و ۵۰۰ سلول مطلوب‌تر به نظر می‌رسند، زیرا شکل واقعی‌تری از مـدل کلـی توزیـع آبراهه‌ها، به دست می‌دهند. بنابراین می‌توان ایـن آسـتانه‌هـا را در مطالعـات کلـی و مقـدماتی، نقشه‌های مقالات و کتاب‌ها، پایان‌نامه‌های دانشجویی و بررسی‌های غیرحرفـه‌ای یـا عمـومی و حتی طـرح‌هـای آمایشـی بـه کـار بـرد. امـا در مـورد مطالعـات تخصصـی ژئومورفولـوژی و هیدرولوژی مانند فرسایش و رسوب، کنترل سیلاب و مدل‌سازی‌های وابسته به نتایج دقیق‌تری نیاز داریم. در این مرحله باید قبول کنیم که لایه‌ی رستری با آستانه ۲۵ سلول به دلیـل نزدیکـی اعداد آن به لایه‌ی زمینی احتمالاً از کارایی بهتر و مفیدتری در موارد بالا برخوردار خواهد بود، اما ملاحظه‌ی بصری این لایه تفاوت‌های چشمگیری را خصوصاً در مورد آبراهه‌های رتبه یـک در مناطق مختلف حوضه به دست می‌دهد. بنابراین در مرحله‌ی بعد به بررسی توزیع فراوانی و طول شاخه‌ها در واحدهای مختلف ژئومورفولوژی می‌پردازیم.

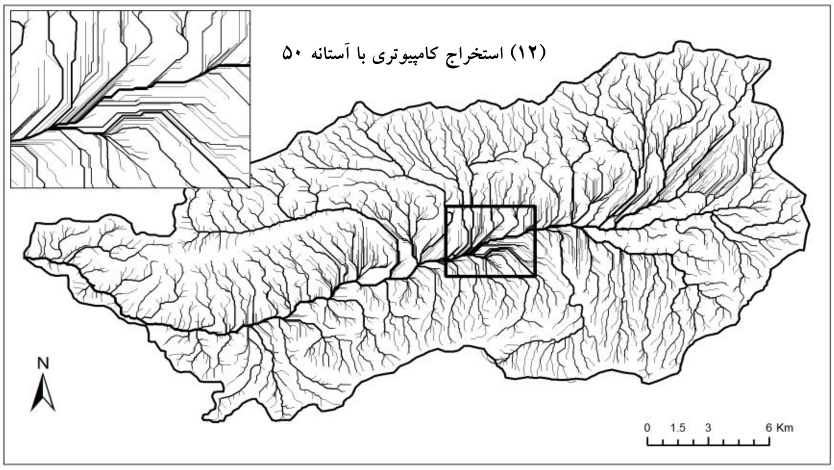
**اشکال شماره ۸ تا ۱۳: نقشه‌های شبکه زهکشی به روش‌های دستی و رایانه‌ای**

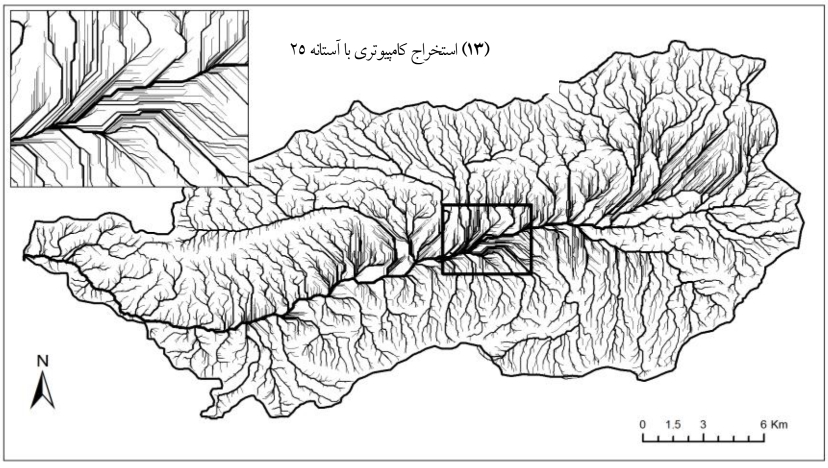



(۱۱) استخراج کامپیوتری با آستانه ۱۰۰
N
0 1.5 3 6 Km


(۱۲) استخراج کامپیوتری با آستانه ۵۰
N
0 1.5 3 6 Km


(۱۳) استخراج کامپیوتری با آستانه ۲۵
N
0 1.5 3 6 Km

**جدول شماره ۲: مقادیر سلولی لایه‌های رستری آبراهه‌ها در روش‌های مختلف و به تفکیک رتبه‌بندی آبراهه**

| روش استخراج آبراهه / رتبه آبراهه | عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای | DEM | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Value>500 | Value>200 | Value>100 | Value>50 | Value>25 |
| ۱ | ۵٤۳۷۰ | ۱۱٦۲۳ | ۱۸۳۷۸ | ۲٤۵۱۷ | ۲۸۳٤٤ | ٤۷۹۷٦ |
| ۲ | ۱۸۱۰۷ | ۵۵۵۹ | ۹۲۱۲ | ۱۲۲۷۵ | ۱۳۷٤۷ | ۲۰۸۳۰ |
| ۳ | ۱۰۹٦٦ | ۲۳۳۰ | ٤۸۰۰ | ٦۰۱٤ | ۷۲۳۲ | ۱۰٦۹۹ |
| ٤ | ۵۷۹۹ | ۳٤٤ | ۱۳۳۷ | ۲٦٤۵ | ۳۲۳۷ | ۵۸۸۰ |
| ۵ | ۲۰۲٦ | ۱۱٤٦ | ۲۸۰ | ۵۸۹ | ۸٤۲ | ۱۸۰۸ |
| ٦ | ٦۷٦ | — | ۱۲۵۹ | ۱۲۲۹ | ۱۰۵۲ | ۲۹۳ |
| ۷ | ۱۲۰۳ | — | — | — | — | ۱۰٦٦ |
| جمع کل | ۹۳۱٤۷ | | | | | ۸۸۵۵۲ |

## مقایسه‌ی خصوصیات توصیفی آبراهه‌ها

جدول شماره ۳ فراوانی آبراهه‌ها و ضریب زه‌کشی حوضه را بـرای نقشـه‌ی زمینـی و نقشه مستخرج از DEM ارائه می‌نماید.

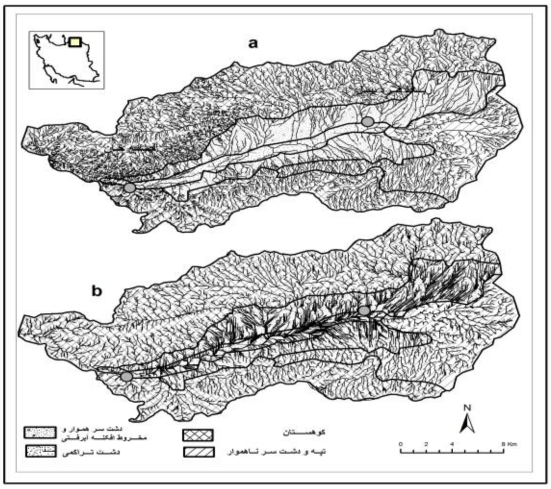
**جدول شماره (۳) مقایسه فراوانی آبراهه‌های حاصل از روش‌های دستی و کامپیوتری**

| رتبه آبراهه / نوع لایه | | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ۵ | ٦ | ۷ | کل آبراهه‌ها |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تعداد آبراهه | زمینی | ٤۷۷۹ | ۱۱۸۷ | ۳۳۷ | ۱۳۷ | ۳۱ | ۱۱ | ۱ | ٦٤۸۳ |
| | DEM | ۵۳٤۸ | ۱٤٤۳ | ٤۳۷ | ٤۱۵ | ۱۱٦ | ٤٦ | ۱ | ۷۸۰٦ |
| درصد تفاوت فراوانی آبراهه‌ها (وکتوری) | | ۱۱ | ۱۸ | ۲۳ | ۷۷ | ۷۳ | ۷٦ | ۰ | ۱۷ |
| درصد تفاوت سلولی (رستری) | | ۱۲ | ۱۳ | ۲ | ۱/٤ | ۱۱ | ۵۷ | ۱۱ | ۵ |
| ضریب زهکشی (لایه زمینی) | | -- | ٤/۰۲ | ۳/۵۲ | ۲/٤ | ٤/۱ | ۲/۸ | -- | -- |
| ضریب زهکشی DEM | | -- | ۳/۷ | ۳/۳ | ۱/۰۵ | ۳/۵۷ | ۲/۵ | -- | -- |

درصد اختلاف آبراهه‌ها برای کل آبراهه‌ها هم در لایه‌های وکتوری و هم رستری، عدد قابل قبولی را ارائه می‌کند، اما علی‌رغم تفاوت اندک تعداد سلول‌ها در رتبه‌های ٤ و ٥ و ٦، میزان اختلاف در فراوانی آبراهه‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که آبراهه‌های رتبه ٤ ، ٥ و ٦ استخراج شده از لایه‌ی DEM به ترتیب ٧٧، ٧٣ و ٧٦ درصد بیشتر از آبراهه‌های دستی هستند. این در حالی است که تعداد آبراهه‌های رتبه ١ اختلاف اندکی دارند و این موضوع بیانگر آن است که پراکندگی آبراهه‌های رتبه ١ در لایه‌ی مستخرج از DEM با مدل واقعی سطح زمین تفاوت زیادی داشته باشد. قبلاً این مسأله با بررسی چشمی لایه‌ها تأیید شده بود، ولی در تحلیل‌های عددی، لایه‌های رستری نمی‌تواند منبع مناسبی برای تجزیه و تحلیل‌های مورفومتری باشد. به منظور تحلیل دقیق توزیع آبراهه‌ها در سطح منطقه و پی بردن به درستی داده‌های مستخرج از DEM با الگوریتم D8، فراوانی آبراهه‌ها را در داخل مرزهای هر واحد ژئومورفولوژی مورد توجه قرار می‌دهیم.

جداول شماره ٤ تا ٧ فراوانی آبراهه‌ها و درصد اختلاف آنها به تفکیک رتبه‌بندی آبراهه در چهار واحد ژئومورفولوژی را براساس نقشه شماره١٤، نشان می‌دهد.

**شکل شماره (۱۴): آبراهه‌های حاصل از روش دستی (a) و رایانه‌ای (b) به تفکیک واحدهای ژئومورفولوژی**



**جدول شماره (۴): فراوانی سلولی و فراوانی آبراهه‌های واحد ژئومورفولوژی کوهستان**

| درصد اختلاف | فراوانی آبراهه‌ها | | درصد اختلاف | فراوانی سلولها | | رتبه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | شبکه DEM | شبکه زمینی | | شبکه DEM | شبکه زمینی | |
| ۳۲/٦ | ۲٦۰٤ | ۳۸٦۷ | ٤۹ | ۱۹۱٦٤ | ۳۷۷۷٦ | ۱ |
| ۲٥/۸ | ٦٤۰ | ۸٦۲ | ۲۱ | ۹۷۱۷ | ۱۲۲۷۷ | ۲ |
| ۳٥/۳ | ۱۳۲ | ۲۰٤ | ۲۲/۳ | ٥۲۹۲ | ٦۸۱۸ | ۳ |
| ٤٤ | ۳۳ | ٥۹ | ۱۳/٥ | ۲۲۷۰ | ۲٦۲۳ | ٤ |
| ٥٥ | ٤ | ۹ | ۱۹ | ٤۷٥ | ٥۸۷ | ٥ |
| -- | ۰ | ۱ | -- | ۰ | ۱۲٦ | ٦ |
| -- | ۱ | ۱ | ۱۰/٦ | ۲۸٥ | ۳۱۹ | ۷ |

**جدول شماره (۵): فراوانی سلولی و فراوانی آبراهه‌های واحد ژئومورفولوژی دشت سرناهموار**

| درصد اختلاف | فراوانی آبراهه‌ها | | درصد اختلاف | فراوانی سلولها | | رتبه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | شبکه DEM | شبکه زمینی | | شبکه DEM | شبکه زمینی | |
| ۳۲/۸ | ۷٤٤ | ٥۰۰ | ۳۰/٤ | ٥٦٥۷ | ۸۱۳٤ | ۱ |
| ٥۸/٥ | ۳٥٤ | ۱٤۷ | ۰/۷ | ۲۹۸٥ | ۲۹٦٤ | ۲ |
| ۷٤/٦ | ۱٥٤ | ۳۹ | ۱۲/٦ | ۱٥۷٤ | ۱۸۰۲ | ۳ |
| ۹۱/۸ | ۱٥۹ | ۱۳ | ٤۹/۸ | ۹۲٦ | ٤٦٥ | ٤ |
| ۹۷/٥ | ۱۱۹ | ۳ | ۹/٦ | ۳۸۸ | ٤۲۹ | ٥ |
| ۹٥ | ٦۱ | ۳ | ۳۲ | ۱۸۹ | ۲۷۹ | ٦ |
| -- | ۳٥ | ۰ | -- | ۲۹ | -- | ۷ |

**جدول شماره(۶): فراوانی سلولی و فراوانی آبراهه‌های واحد دشت سرپوشیده و مخروط‌افکنه‌ها**

| درصد اختلاف | فراوانی آبراهه‌ها | | درصد اختلاف | فراوانی سلولها | | رتبه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | شبکه DEM | شبکه زمینی | | شبکه DEM | شبکه زمینی | |
| ٧٦/٥ | ١٤٨٦ | ٣٤٨ | ٦٣ | ١٩٢٢٣ | ٧٠٥٠ | ١ |
| ٥٢/٢ | ٣١٠ | ١٤٨ | ٥٦/٣ | ٦٧٦٧ | ٢٩٥٥ | ٢ |
| ٣٢/٦ | ٩٥ | ٦٤ | ٢١/٨ | ٣٢٨٩ | ٢٥٧١ | ٣ |
| ٨٤/٢ | ٢٣٥ | ٣٧ | ٢٠/٨ | ٢١٠٦ | ٢٦٦٠ | ٤ |
| ٧٦/٩ | ٣٩ | ٩ | ١٣/٧ | ٨٣٣ | ٧١٩ | ٥ |
| ٦٠ | ١٠ | ٤ | ٧١/٣ | ٦٢ | ٢١٦ | ٦ |
| | -- | -- | -- | ٤ | ١١٥ | ٧ |

**جدول شماره (۷): فراوانی سلولی و فراوانی آبراهه‌های واحد مورفولوژی دشت تراکمی**

| درصد اختلاف | فراوانی آبراهه‌ها | | درصد اختلاف | فراوانی سلولها | | رتبه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | شبکه DEM | شبکه زمینی | | شبکه DEM | شبکه زمینی | |
| ٨٧/٥ | ٥١٤ | ٦٤ | ٩١/٩ | ٥٠٥٦ | ٤١١ | ١ |
| ٧٨/٤ | ١٣٩ | ٣٠ | ٨٧ | ١٦٩٨ | ٢٢٠ | ٢ |
| ٤٩ | ٥١ | ٢٦ | ٤٧/٥ | ٧٤٨ | ٣٩٣ | ٣ |
| ٠ | ٢٨ | ٢٨ | ٤١/٧ | ٦٧٤ | ٣٩٣ | ٤ |
| ١٦/٦ | ١٢ | ١٠ | ٥١/٤ | ١٩٢ | ٣٩٥ | ٥ |
| ٦٦/٦ | ١ | ٣ | ٦٠/٢ | ٣١ | ٧٨ | ٦ |
| -- | ١ | ١ | -- | ٨٢١ | ٨٨٦ | ٧ |

نتایج نشان می‌دهند که درصد اختلاف، بین دو لایه در واحد مورفولوژی کوهستان، نسبت به دیگر واحدها کمتر بوده و این اختلاف به نفع تعداد آبراهه‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در تمام رتبه‌ها، فزونی دارد. این اختلاف در مورد آبراهه‌های رتبه ۱ و ۲ حدود سی درصد است، ولی با افزایش رتبه‌ی آبراهه‌ها افزایش می‌یابد. مقایسه‌ی فراوانی سلول‌ها در آبراهه‌های مختلف همخوانی خوبی با تعداد شاخه‌های وکتوری در کوهستان را نشان می‌دهد و بر این اساس می‌توان گفت تجزیه و تحلیل‌های رستری و وکتوری تعداد آبراهه‌ها و ضریب زه‌کشی مبتنی بر لایه‌ی مستخرج از DEM برای واحد ژئومورفولوژی کوهستان و در دامنه‌ی آستانه‌های ۲۰ تا ۳۰ به واقعیت نزدیک بوده و قابل اطمینان است. درصد اختلاف در واحد ژئومورفولوژی دشت سر ناهموار برای لایه‌های وکتوری فقط در مورد آبراهه‌های رتبه ۱ کم بوده ولی به طور ناگهانی برای رتبه‌های بالاتر افزایش چشمگیری یافته و حتی به بیش از نود درصد نیز می‌رسد. این اختلافات همیشه به نفع لایه‌ی مستخرج از DEM بر لایه‌ی زمینی فزونی دارد. بنابراین در این واحد مورفولوژی فقط فراوانی شاخه‌های رتبه ۱ صحیح بوده و می‌تواند مورد اطمینان باشد. همچنین، میزان اختلاف لایه‌های رستری هیچ گونه همخوانی با لایه‌ی وکتوری نداشته و علی‌رغم اختلاف اندک(حتی نزدیک به صفر)، نمی‌تواند منبع خوبی برای تجزیه و تحلیل‌های مربوط به تعداد آبراهه‌ها قرار گیرد. در مورد سایر واحدهای ژئومورفولوژی یعنی دشت سرپوشیده و دشت تراکمی تنها تعداد آبراهه‌های رتبه ۳ در محدوده‌ی دشت سرپوشیده و تعداد آبراهه‌های رتبه ٤ و ۵ نتایج صحیحی را در استخراج از لایه‌ی DEM نشان می‌دهند. در این واحدها نیز میزان اختلاف همه جا به نفع لایه‌ی مستخرج از DEM بوده و تنها در رتبه‌های ٤ و ۵ برابری کامل بین این دو در واحد دشت تراکمی به چشم می‌خورد. بد نیست اشاره شود که در این تجزیه و تحلیل‌ها آبراهه رتبه ۷ به دلیل منفرد بودنش مورد نظر قرار نگرفته است. جدول شماره ۸ طول شاخه‌ها و درصد اختلاف آنها را در لایه‌های زمینی و رایانه‌ای نشان می‌دهد. براساس جدول بالا اگر هدف محاسبه‌ی طول شاخه‌ها و ضریب زه‌کشی برای کل حوضه باشد، نتایج حاصل از DEM صحیح به نظر می‌رسد، زیرا درصد اختلافات بسیار جزئی است؛ اما وقتی به محاسبه‌ی این شاخص‌ها در واحدهای مختلف ژئومورفولوژی می‌پردازیم نتایج متفاوتی حاصل می‌شود.

**جدول شماره (۸): مقایسه‌ی طول شاخه‌ها در واحدهای مختلف ژئومورفولوژی لایه‌های زمینی و مستخرج از DEM (به کیلومتر)**

| رتبه آبراهه | کل حوضه | | | واحد کوهستان | | | دشت سرناهموار | | | دشت سرپوشیده | | | دشت تراکمی | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Geo | DEM | درصد اختلاف | Geo | DEM | درصد اختلاف | Geo | DEM | درصد اختلاف | Geo | DEM | درصد اختلاف | Geo | DEM | درصد اختلاف |
| ۱ | ۱۲۷۰ | ۱۳۰۲ | ۲/۵ | ۹۰۰ | ۵۲۱ | ٤۲ | ۱۹۵ | ۱٤۵ | ۳۵/٦ | ۱٦۸ | ٤۹۵ | ٦٦ | ۱۰ | ۱٤۸ | ۹۳/۲ |
| ۲ | ٤٦۵ | ۵۷۸ | ۱۹/۵ | ۳۱٤ | ۲۷۱ | ۱۳/۷ | ۷٤ | ۸۰ | ۷/۵ | ۷۲ | ۱۷۵ | ۵۸/۸ | ٦ | ٤۹ | ۸۷/۸ |
| ۳ | ۲۸۷ | ۲۹٦ | ۳ | ۱۷۱ | ۱٤٤ | ۱۵/۸ | ٤۵ | ۳۹ | ۱۳/۳ | ٦۲ | ۹۲ | ۳۲/٦ | ۱۰ | ۲۱ | ۵۲/٤ |
| ٤ | ۱٤۹ | ۱٦۳ | ۸/٦ | ٦۵ | ٦۲ | ۵ | ۱۱ | ۲۵ | ۵٦ | ٦٤ | ۵۷/۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۹ | ٤۷/٤ |
| ۵ | ۵۲ | ۵۳ | ۱/۹ | ۱٤ | ۱۳ | ۷ | ۱۱ | ۱۰ | ۹ | ۱۷ | ۲٤ | ۲۹ | ۱۰ | ٦ | ٤۰ |
| ٦ | ۱۷ | ۸ | ۵۳ | ۳ | — | — | ٦/۹ | ٦ | ۱۲/۸ | ۵ | ۲ | ٦۰ | ۲ | ۱ | ۵۰ |
| ۷ | ۳۳ | ۳٤ | ۲/۹ | ۸ | ۸/۲ | ۰ | — | — | — | ۳ | — | — | ۲۲ | ۲۵ | ۱۲ |

* اعداد گرد شده اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در منطقه‌ی کوهستانی و در مورد شاخه‌های رتبه ۱ اختلاف قابل توجهی با نظریّات پژوهشگران قبلی وجود دارد، زیرا آنان مناطق پرشیب را به اصطلاح بدون خطا تشخیص داده بوده‌اند، در حالی‌که طول شاخه‌های ۱ در واحد کوهستان در روش رایانه‌ای تقریباً نصف طول همین شاخه‌ها در لایه‌ی زمینی هستند. سایر موارد به جز رتبه‌ی ٦ در واحد کوهستان، نتایج قابل اطمینانی به دست می‌دهند. در واحد مورفولوژی دشت سرناهموار، که محدوده‌ی گسترش تپه‌های ساختمانی و آبرفتی است، نتایج لایه DEM برای محاسبه‌ی طول شاخه‌ها و تراکم زه‌کشی کاملاً قابل استفاده است، درحالی که در واحدهای دشت سر پوشیده و دشت تراکمی به ترتیب میزان اختلافات افزایش می‌یابد ولی این افزایش در رتبه‌های پایین تر زیاد و به سمت رتبه‌های بالاتر کاهش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان گفت اگر یک حوضه‌ی آبریز خیلی پر شیب یا خیلی کم شیب باشد، نتایج استخراج آبراهه از لایه‌های DEM برای محاسبه‌ی طول شاخه‌ها نمی‌تواند صحیح باشد، البته با این توضیح که میزان خطاها در

حوضه‌های کم شیب‌تر افزایش می‌یابد. حوضه‌های یکدست با شیب متعادل که عمدتاً تپه ماهوری هستند نتایج صحیح‌تری از تجزیه و تحلیل‌های طول رود به دست می‌دهند، لذا در استفاده از روش‌های رایانه‌ای باید به خوبی خصوصیات فیزیوگرافی و مرفولوژی حوضه‌ها را شناخت تا بهترین آستانه‌ها و بهترین تقسیم‌بندی‌های ناحیه‌ای را برای ارتقاء نتایج استخراج آبراهه به کار برد. به بیان دیگر، بر اساس نتایج مربوط به خصوصیات توصیفی تحلیل‌های مرفومتری می‌توان اظهار داشت که قابلیت الگوریتم‌های استخراج آبراهه در ArcGIS در تعیین مسیر آبراهه‌ها در مناطق کم شیب ناتوان ودر مناطق پر شیب با خطاهایی همراه است.

## ارزیابی دقت مکانی آبراهه‌های مستخرج از DEM

به منظور ارزیابی دقت مکانی آبراهه‌های مستخرج به روش رایانه‌ای، تحلیل هم‌پوشانی از نوع محلی بین لایه‌های رستری زمینی و رستری مستخرج از DEM به عمل آمد. این عملیات بدون انجام هرگونه تحلیل همسایگی، روی لایه‌های منفرد یعنی با ابعاد سلول اولیه (۳۰ متر) انجام گرفت. نتایج هم‌پوشانی دو لایه مقدار ۳۱/۷۵ درصد موقعیت‌های مشترک آبراهه‌ها را برای کل حوضه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد. گر چه این مقدار نسبتا مناسب به نظر می‌رسد، اما این هم‌پوشانی بدون در نظر گرفتن رتبه‌ی آبراهه‌ها بوده و به معنای آن است که هر آبراهه‌ای با هر آبراهه‌ای می‌تواند پوشش داشته باشد. میزان هم‌پوشانی مقایسه‌ای یا به عبارت بهتر دقت موقعیت مکانی آبراهه‌های مستخرج از DEM با الگوریتم‌های مربوط در جدول شماره ۹ نشان داده شده است. با توجه به جدول می‌توان چنین اظهار نمود که دقت نتایج به دست آمده به تفکیک آبراهه‌ها اعداد بسیار پایینی را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که این مقدار برای آبراهه‌های درجه ۱، ۲، ۳ و ٤ بین حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد بوده و برای سایر آبراهه‌ها به کمتر از ده و حتی پنج درصد افت می‌کند. حتی با افزایش ده متر بر ابعاد سلول‌های آبراهه ارقام چندان رضایت بخشی به دست نیامد، به گونه‌ای که این ارقام مثلاً برای آبراهه‌های رتبه ۱ از ١٤/٨ درصد به حدود ۲۰ درصد افزایش یافت که بیانگر عدم دقت الگوریتم‌های موجود حداقل در کارهای با جزئیات بیشتر است. به منظور بررسی میزان دقت مکانی آبراهه‌ها،

عملیات هم‌پوشانی دو لایه به تفکیک واحدهای مورفولوژی چهار گانه نیز به عمل آمد، ولی نتایج آن چندان رضایت‌بخش نبود. جدول شماره ۱۰فقط درصد هم‌پوشانی آبراهه‌های با رتبه‌ی متناظر را در دو واحد کوهستان و دشت سر ناهموار نشان می‌دهد. علت عدم درج اعداد مربوط به دو واحد دیگر این است که این واحدها در لایه‌ی DEM، تعداد بسیار زیادی آبراهه‌های غیرواقعی درجه ۱ دارند که در تحلیل هم‌پوشانی نتایج غلطی را به دست می‌دهند و اصولاً مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر صحیح به نظر نمی‌رسد.

**جدول شماره (۹): درصد هم‌پوشانی آبراهه‌ها در لایه‌های زمینی و DEM در کل حوضه آبریز**

| DEM / Geo | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ٥ | ٦ | ۷ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱٤/۸ | ٤/۹ | ۱/۲ | ۰/٥٦ | ۰/۱۱ | ۰/۰٤ | ۰/۰٥ |
| ۲ | ٥/۷ | ۲۱/٥ | ۷ | ۱/٦ | ۰/۱٥ | ۰/۰٤ | ۰/۲ |
| ۳ | ۲/٤ | ۱۱/۳ | ۱۸/۹ | ٥/٦ | ۰/٤٥ | ۰/۰۷ | ۰/۲ |
| ٤ | ۱/۳ | ٥/٦ | ۹/۸ | ۱٤/۸ | ۱/۱ | ۰ | ۰/۱٥ |
| ٥ | ۰/٤۲ | ٤/۱ | ۱/٦ | ٥/٦ | ٦/۳ | ۲/۷ | ۰/٦ |
| ٦ | ۰/۱۳ | ٦/٦ | ۳/٤ | ۱ | ۹/٥ | ۱/۹ | ۰/۱ |
| ۷ | ۰/۱ | ٥/۹ | ۲/٥ | ۲/۳ | ۰/۲٤ | ۰ | ۷/٦ |

**جدول شماره (۱۰): درصد هم‌پوشانی آبراهه‌ها در لایه‌های زمینی و DEM برای واحد کوهستان و دشت‌سر ناهموار**

| واحد مورفولوژی / رتبه آبراهه | کوهستان | دشت‌سر ناهموار |
|---|---|---|
| ۱ | ۱٤ | ۱۸ |
| ۲ | ۲۳ | ۲۸ |
| ۳ | ۲۲ | ۲۳ |
| ٤ | ۲۱ | ۳٥ |
| ٥ | ۱۳ | ۱٦ |
| ٦ | -- | ٤ |
| ۷ | ۲٤ | -- |
| جمع کل آبراهه‌ها | ۳۱ | ۳٥ |

## نتیجه گیری

این مطالعه فقط روی یکDEM ۳۰ متری از نوع ASTER صورت گرفته و با در نظرگرفتن جوانب احتیاط می‌توان نتایج به دست آمده به شرح زیر را حداقل برای DEMهای تا ۳۰ متری مورد استفاده قرار داد. بخشی از این نتایج به الگوریتم‌ها و بخشی دیگر به DEMها مربوط می‌شود.

۱. مطالعه‌ی انجام شده، نشان می‌دهد که استفاده از DEMها برای استخراج شبکه‌ی زه‌کشی فقط برای کارهای عمومی و مطالعات مقدماتی مناسب است. تقریباً در هرگونه مطالعه‌ی تخصصی که نیاز به داده‌های دقیق و نزدیک به زمین واقعی داریم، بهترین راه برای استخراج شبکه‌های زه‌کشی عکس‌های هوایی بزرگ مقیاس و یا تصاویر ماهواره‌ای است.

۲. برخلاف تصوّر پژوهشگران قبلی که مقایسه‌ی نتایج مورفومتری را بر مبنای تحلیل‌های رستری لایه‌های آبراهه استوار نموده‌اند، به نظر می‌رسد که لایه‌های رستری نمی‌توانند منبع مناسبی برای مقایسه‌ی نتایج دو روش استخراج آبراهه باشد و در صورت تبدیل آنها به لایه وکتوری، نتایج روشن‌تر و واضح‌تری به دست می‌آید.

۳. آستانه‌های ۲۰ تا ۳۰ سلول برای تعیین مسیر آبراهه‌ها، نتایج کلی نزدیک به نقشه‌های دستی را در یک حوضه‌ی آبریز برای کل آبراهه‌ها و در سطح کل حوضه‌ی آبریز ارائه می‌نماید، لذا می‌تواند در مطالعات اولیه یا مطالعاتی که نیاز به تفکیک واحدهای کوچک‌تر در سطح حوضه‌ی آبریز ندارند و یا در مطالعاتی که به رتبه‌ی آبراهه توجه نمی‌شود، مورد استفاده قرار گیرد. آستانه‌های بالاتر از ۵۰۰ سلول گرچه تعداد زیادی از آبراهه‌های رتبه یک را حذف می‌کند، ولی مدل کلی واقعی‌تری را به دست می‌دهد و بنابراین می‌تواند در کارهای کوچک‌مقیاس یا مدل‌سازی‌های کوچک‌مقیاس شبکه‌ی زه‌کشی مورد استفاده قرار گیرد. درحوضه های آبریز با شرایط متفاوت، بهتر است مثلاً در کوهستان آستانه‌ی ۲۵، در دشت‌سر آستانه‌ی ۱۰۰، در مخروط افکنه‌ها آستانه ۲۵۰ و در دشت تراکمی آستانه‌ی ۵۰۰ سلول انتخاب شود.

٤. هنوز الگوریتم‌های رایانه‌ای فعلی قادر به تعیین مسیر شبکه‌ی آب‌ها در مناطق کم شیب نیستند و برخلاف تصوّر پژوهشگران قبلی در مناطق پرشیب نیزتفاوت‌های قابل توجهی درمیزان طول شاخه های رتبه ۱ با لایه های دستی به چشم می‌خورد و این نشان می‌دهد که الگوریتم‌های رایانه‌ای استخراج آبراهه ازDEM ها در مناطق کم‌شیب برای تجزیه و تحلیل‌های طول رود ناتوان ودر مناطق پرشیب هم با خطاهایی همراه است. تنها در مناطق تپه ماهوری و یا شیب‌های متعادل این شرایط بهبود می‌یابد.

۵. الگوریتم‌های رایانه‌ای و دقت DEM ها توأماً در تعیین دقیق مکان شبکه‌ی زه‌کشی ضعف‌های اساسی دارند، به طوری‌که در مطالعه‌ی فعلی در بهترین شرایط و بدون در نظر گرفتن رتبه‌ی آبراهه‌ها میزان هم‌پوشانی مسیرهای دو لایه‌ی آبراهه‌ی مستخرج از DEM و روش دستی حدود سی درصد و با درنظرگرفتن رتبه‌ی آبراهه به کمتر از بیست درصد می‌رسد که ارقام غیرقابل قبولی را ارائه می‌دهد. به همین منظور پیشنهاد می‌شود محققین جغرافیا و GIS نسبت به آزمون DEMهای مختلف برای استخراج شبکه‌ی زه‌کشی اقدام نموده و نقایص موجود را جهت بهتر روشن شدن ضعف الگوریتم‌ها یا DEM ها معرّفی نمایند.

## منابع و مآخذ


۱. حسین‌زاده، سیدرضا و علیرضا بیدخوری، (۱۳۸۹)، ***سیستم‌های اطلاعات جغرافیائی (چاپ دوم)***، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.

۲. ***سازمان جغرافیایی کشور و سازمان نقشه‌برداری کشور***: نقشه‌های ۲۵۰۰۰: ۱ توپوگرافی منطقه مطالعاتی.

۳. ***سازمان زمین‌شناسی کشور***: نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه.

۴. فریفته، جمشید، (۱۳۷۰)، ***تحلیل‌های کمی در ژئومورفولوژی***، انتشارات دانشگاه تهران.

5. Bian, L. and walsh, S.J. 1993 *scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana*. The professional Geographer. 45(1), 1-11.
6. Donker, N. 1992: *Automatic extraction of cachment hydrologic properities from digital elevation model*: ITC Journal 3. pp. 257-265.
7. Douglas, P.H., 1986. *Experiments to locate ridges and channels to creat a new type of digital elevation model*. Cartographica, 23, pp. 29-61.
8. Garcia, M. J. L and camarasa, A. M. 1999: *use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM*: JAG Journal, 1(3/4) pp. 187-195.
9. Jiang Li, David W.S.Wong. 2010: *Effects of DEM sources on Hydrologic applications*. Computers, Environment and urban systems. 34. pp. 251-261.
10. Kamp, U., Bolch, T. and olsenholler, J. 2005: *Geomorphometry of cerro sillajhuay* (Andes, chile / *Bolina) Comparis of digital elevation mode (DEM's) from ASTER. Remot sensing data and contour maps*. Geocarto International. 20, 23-33.
11. Kienzle, S. 2004, *the effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives*. Transactions in GIS, 8(1), pp. 83-111.
12. Lam, N, Quattrochi, D.A. 1992. *on the issues of scale, resolution, and fractal analysis in the mapping sciences*. The professional Geographer, 44(1), pp. 88-98
13. Lassueur, T., Joost, S., Randin, C.F. 2006: *very high resolution digital elevation models*. Do they improve models of plant species distribution? Ecological Modeling 198(1-2), pp. 139-153.
14. Nikolakopoulos, K. G. and Karmaratakis, E.K. and Chrysoulakis. N: 2006: SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete Greece: International Journal of remote sensing. 27(21). Pp. 4819-4838.
15. Peunker, T. and Douglas, D.H, 1975. *Detection of surface – specific points by local parallel processing of discreate terrain-elevation data*. Computer

Graphics and image processing. 4, pp. 375-387.
16. Smith, M. J. and pain, C.F. 2009: *Applications of remote sensing in geomorphology*: progress in physical Geography, 33(4) pp. 568-582.
17. Torwaki, J. and Fukumura, T. 1978. *Extraction of structural information from grey pictures computer Graphics and image processing*, 8. pp 30-51.
18. Tribe, A. 1992. *Automated recognition of vally lines and draingge networks from grid digital elevation Models*: a review and a new method Journal of Hydrology. 139: pp. 263-293.
19. Wise, S. 2000: *Assessing the quality of digital elevation models derived from contours for hydrological applications*: Hydrological processes, 14. 1909-1929.
20. WU, S., Li. J., and Huang, G.H. 2008: *A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications*: sensivity to elevation data resolution. Applied Geography, 28, 210-223.

**تشکر و قدردانی**

این مقاله نتیجه‌ی طرح پژوهشی شماره ۸۷/۱۴۲ مصوبه‌ی مورخ ۱۳۸۷/۱۲/۲٤ بوده که هزینه‌های انجام آن از طرف معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تأمین گردیده است. لذا در پایان نگارندگان لازم می دانند مراتب سپاسگزاری خود را از آن معاونت محترم و همچنین معاونت محترم دانشکده ادبیات و علوم انسانی ابراز نمایند.